

Исследования вулканического воздействия и антропогенного отпечатка в континуумах «речной водосбор-эстуарий-прибрежные воды» Камчатки

Семкин П.Ю.¹, Павлова Г.Ю.¹, Барабанщиков Ю.А.¹, Байгубеков К.Р.¹, Лепская Е.В.², Уланова О.А.¹, Шкирникова Е.М.¹, Швецова М.Г.¹, Лобанов В.Б.¹, Jiang Sh.³, Zhang J.³

Studies of volcanic impact and anthropogenic imprint in the «river catchment-estuary-coastal waters» continuum of Kamchatka

Semkin P.Yu., Pavlova G.Yu., Barabanshchikov Yu.A., Baygubekov K.R., Lepskaya E.V., Ulanova O.A., Shkirnikova E.M., Shvetsova M.G., Lobanov V.B., Jiang Sh., Zhang J.

¹ ТООИ им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток;

e-mail: pahno@list.ru

² Камчатский филиал «Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии», г. Петропавловск-Камчатский;

³ State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research (SKLEC), East China Normal University (ECNU), Shanghai, China

Исследуются двойные изотопные сигнатуры в NO_3^- и H_2O , биогенные вещества и макрокомпонентный состав воды на протяжении от речных водосборов рек Камчатка, Авача и Пенжина до промежуточных водных масс в приемных бассейнах рек. Работа основана на результатах экспедиций и лабораторных измерений, проведенных в период с 2022 по 2024 гг.

Введение. Несмотря на важность потоков веществ с речным стоком в масштабах Мирового океана, в литературе практически не обсуждаются механизмы связи биогенных веществ (БВ: DIN, DIP, DSi, P_{org} , N_{org}) и растворенного органического углерода (DOC) с продукционно-деструкционными процессами органического вещества (ОВ) в прибрежных акваториях с активным вулканизмом [6].

Ранее сообщалось об относительно высоких концентрациях DIP и P_{org} в реке Камчатка в районе ст. 4, 5, 6 (рис. 1) и DIN в реках Авача и Вилюча [1, 5, 9].

В данной работе изучаются концентрации DIN, DIP, DSi, DOC, стабильные изотопные составы ($^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$, $^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$, $^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$, $^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$) и макрокомпонентный состав воды на протяжении от речных водосборов рек Камчатка, Авача и Пенжина до промежуточных водных масс по обе стороны полуострова Камчатка с целью решения следующих ключевых вопросов: (1) каковы основные источники БВ в исследуемых бассейнах; (2) какие пути и механизмы приводят к трансформации DIN, DIP, DSi, DOC; (3) каковы потенциальные экологические воздействия на прибрежные экосистемы, вызванные поступлением DIN, DIP, DSi, DOC с речным стоком и изменчивостью интенсивности и направленности баланса «продукция-деструкция» ОВ.

Объект исследований и данные. Крупнейшие реки Камчатского края – Камчатка и Пенжина. Их водосборы расположены относительно близко друг к другу (рис. 1), но сильно различаются условиями гидрогеологии и гидрометеорологического режима [4]. Эти различия обусловлены активным вулканизмом и большим ежегодным влагозапасом в виде снега на Тихоокеанском побережье на востоке полуострова Камчатка, где существует 29 действующих вулканов [2], чего нет на Охотоморском берегу на западе полуострова и в бассейне р. Пенжина. Следующая по величине речного стока – река Авача – испытывает антропогенное воздействие [3]. Таким образом, на примере трех крупнейших рек Камчатки возможно изучать природные и антропогенные источники и потоки веществ, в том числе, связанные с вулканизмом.

Основные гидрологические особенности водного режима изучаемых рек, характеристики водосборов и заливов-эстуариев, экспедиционные работы, методы измерений БВ, макрокомпонентов и стабильных изотопов ^{18}O и $^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$ воды описаны в предыдущих работах [5, 9]. Важнейшая особенность гидрологического режима рек Камчатка и Авача – высокая доля подземного стока. В средний по водности год для р. Камчатки эта величина составляет 50-70 % [4].

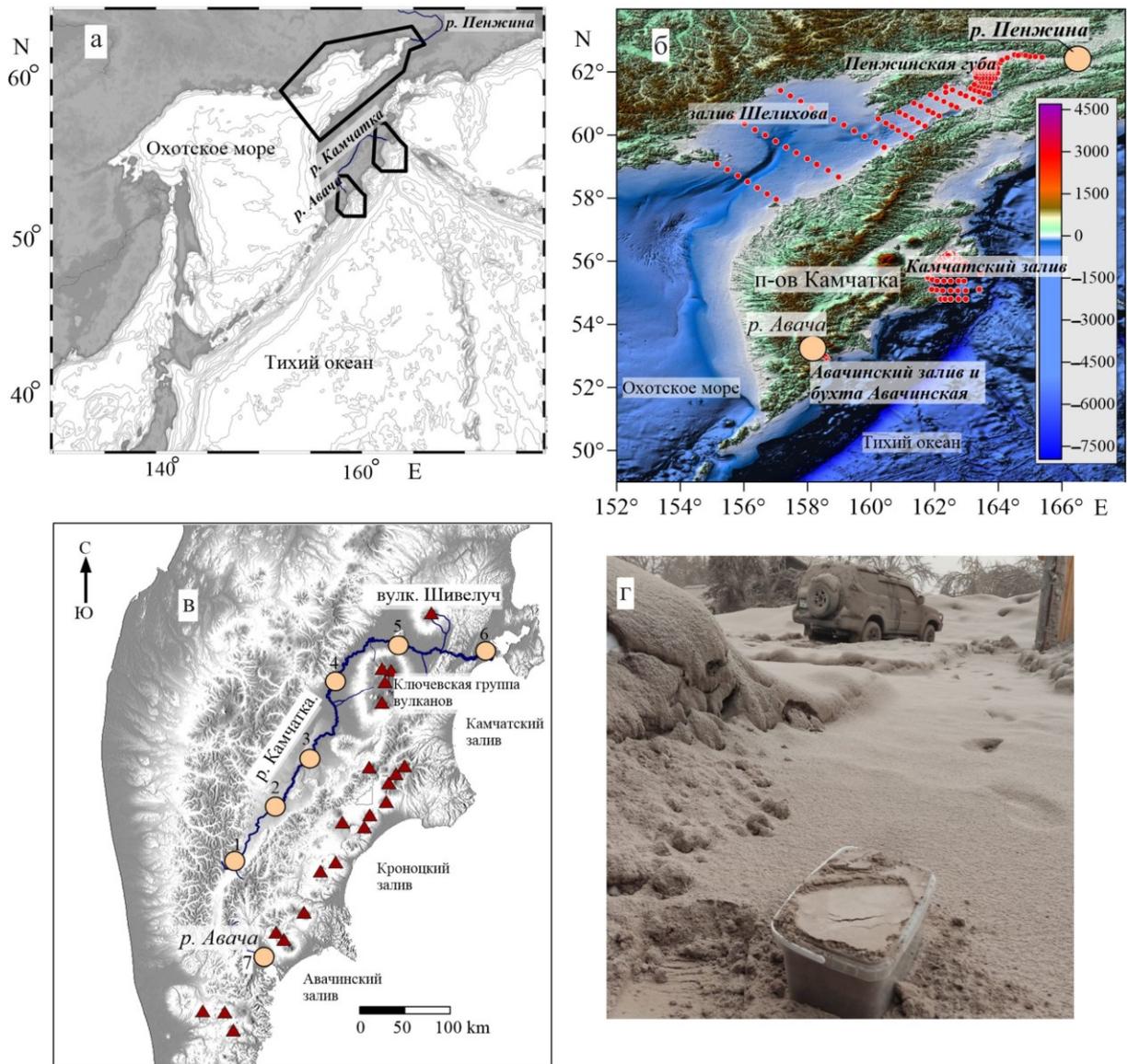


Рис. 1. Изучаемый регион (а): ● – станции отбора проб воды в реках (б, в) в 2023-2024 гг.; ● – станции отбора проб воды в заливах-эстуариях в 2022 (бухта Авачинская) и в 2023 гг. (Камчатский залив и Пенжинская губа с заливом Шелихова) (б); ▲ – действующие вулканы в бассейнах изучаемых рек; (г) – фото отбора пробы вулканического пепла в р-не п. Ключи 11 апреля 2023 г.

Анализ стабильных изотопов NO_3^- ($\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{18}\text{O}$) был выполнен с предварительным переводом NO_3^- из проб воды в N_2O с использованием микробиологического метода и далее проанализирован на масс-спектрометре Delta V (Thermo Fisher Co. США) на базе лаборатории SKLEC (State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, Shanghai, China). Воспроизводимость $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{18}\text{O}$ составляет 0.22 ‰ и 0.51 ‰, соответственно. Схемы станций отбора проб воды в реках и в прибрежно-морских акваториях представлены на рис. 1.

Результаты. В распределении стабильных изотопов $^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$, $^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ выявлены следующие закономерности и особенности:

1) река Пенжина имеет наиболее легкий изотопный состав (рис. 2а) за счет значительной разницы в широтном расположении водосбора по отношению к рекам Камчатка и Авача (рис. 1);

2) река Камчатка контрастно разделена на облегченный (ст. 1, 2, 3) и утяжеленный (ст. 5, 6) изотопный состав по условной границе водосбора в районе

действующих вулканов Ключевской группы и Шивелуча (до и после п. Ключи, рис. 1, рис. 2а). Данная особенность, вероятно, может быть связана с существенным увеличением доли грунтовых вод, в том числе гидротермального происхождения в р. Камчатка в указанном районе водосбора;

3) река Авача имеет наиболее утяжеленный изотопный состав, несмотря на южное расположение водосбора (рис. 1) по отношению к верхнему бассейну реки Камчатка (ст. 2, 3, 4) (рис. 2а). Наиболее утяжеленный изотопный состав также может быть результатом относительно большой доли грунтовых вод в питании р. Авача (см. Объект исследований и данные);

4) для рек Камчатка и Авача наиболее существенное систематическое смещение маркеров изотопного состава ниже относительно Глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) наблюдается в сентябре, а смещение выше относительно ГЛМВ – в апреле (рис. 2а). Сдвиги изотопного состава относительно ГЛМВ между сезонами, во-первых, могут быть связаны с различным временем нахождения грунтовых вод в водоносных горизонтах и, соответственно, с различным изотопным обменом между породой и водой, которая в дальнейшем питает исследуемые реки; во-вторых, со сменой с дождевого на снеговое питание рек в сентябре и апреле, соответственно.

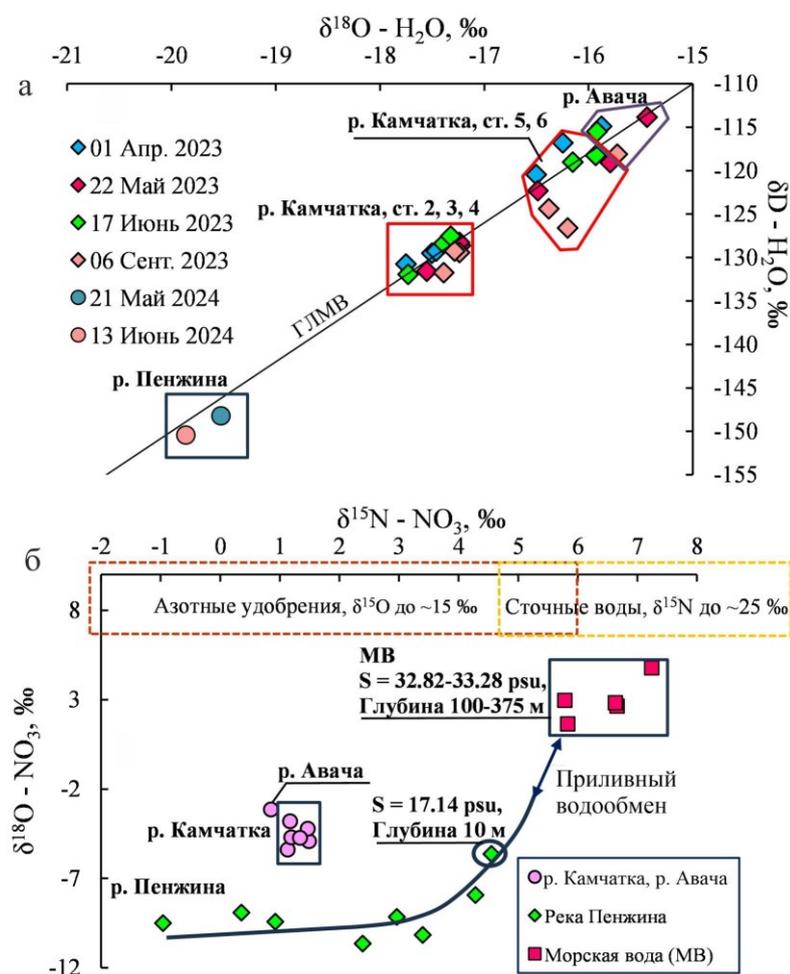


Рис. 2. Сезонная изменчивость стабильных изотопов $^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$, $^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ (а) в реках Камчатка, Авача и Пенжина и стабильных изотопов $^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$, $^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ в указанных реках (б), а также в кутовой части Пенжинской губы и в промежуточной охотоморской водной массе с ядром на глубине 350 м. Изотопная характеристика для азотных удобрений и сточных вод представлена на основе литературных данных [8]. ГЛМВ – глобальная линия метеорных вод [7].

Двойные изотопные сигнатуры $^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$, $^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ являются надежными и перспективными трассерами для отслеживания источников и путей миграции NO_3^- . Полученные результаты в ходе данного исследования выявили следующие особенности (рис. 2б):

1) изотопный состав NO_3^- практически не изменяется на всем протяжении р. Камчатка, не зависит от концентрации БВ и практически полностью совпадает с составом р. Авача (рис. 2б). Данная особенность указывает на природный источник

NO_3^- для двух рек, несмотря на присутствие коммунально-бытовых стоков и стоков с сельскохозяйственных полей в долине р. Авача [3], изотопный состав которых должен быть гораздо более утяжелен, согласно литературным данным [8];

2) река Пенжина имеет облегченный изотопный состав NO_3^- по отношению к рекам Камчатка и Авача. По мере возрастания солёности воды в кутовой части Пенжинской губы происходит добавление тяжелого изотопа ^{18}O в NO_3^- , вероятно, в результате поступления NO_3^- со стороны приливных осушек. Далее, по мере продвижения в мористую часть исследуемого района, происходит утяжеление NO_3^- обоими изотопами в результате влияния морского источника – промежуточной охотоморской водной массы и интенсивного приливного перемешивания (рис. 2б).

Выводы. Мы представляем потоки DIP, P_{org} , DSi, DIN и N_{org} в речном стоке с вулканических водосборов Восточной Камчатки в качестве основного триггера для весенне-летнего «цветения» фитопланктона и последующей высокой биомассы зоопланктона на примере Камчатского залива, бухты Авачинской и Авачинского залива. В то время как на северо-западе полуострова в Пенжинской губе морской источник является доминирующим, прежде всего для DIN и DIP, по сравнению с речными поступлениями.

Авторы благодарны к.г.н. С.Л. Горину за консультации и помощь на всех этапах данной работы.

Работа выполнена в ТОИ ДВО РАН при поддержке Межведомственной комплексной программы научных исследований Камчатского полуострова и сопредельных акваторий в 2024-2026 гг., рег. № 124072200009-5 (экспедиционные работы) и РФФИ, грант № 23-77-10001 (<https://rscf.ru/project/23-77-10001/>) (анализ проб воды).

Список литературы

1. Агафонова К.Г. Гидрохимический режим рек Камчатки // Вопросы географии Камчатки. 1964. Вып. 2. С. 46-55.
2. Влодавец В.И., Пийп Б.И. Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюллетень вулканологических станций. 1957. № 25. С. 5-95.
3. Лепская Е.В.; Тепнин О.Б., Коломейцев В.В. и др. Исторический обзор исследований и основные результаты комплексного экологического мониторинга Авачинской губы в 2013 году // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2014. № 34. С. 5-21.
4. Ресурсы поверхностных вод СССР. 1973. Том 20. Камчатка. Л.: Гидрометеиздат. 368 с.
5. Семкин П.Ю., Павлова Г.Ю., Лобанов В.Б. и др. Сезонная изменчивость биогенных элементов (P, N, Si, C) в реках Камчатка и Авача (п-ов Камчатка) в 2023 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXVII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 27-29 марта 2024 года. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2024. С. 325-328.
6. Beusen A.H., Bouwman A.F., Van Beek L.P. et al. Global riverine N and P transport to ocean increased during the 20th century despite increased retention along the aquatic continuum // Biogeosciences. 2016. V. 13. № 8. P. 2441-2451. <https://doi.org/10.5194/bg-13-2441-2016>
7. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. 1961. № 133. P. 1702-1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
8. Lao Q., Liu G., Gao J. et al. Seasonal Sources and Cycling of Nitrogen Revealed by Stable Isotopes in the Northeastern Beibu Gulf, China // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. V. 9. Art. 1123. <https://doi.org/10.3390/jmse9101123>
9. Semkin P.Yu., Pavlova G.Yu., Lobanov V.B. Nutrient Flux under the Influence of Melt Water Runoff from Volcanic Territories and Ecosystem Response of Vilyuchinskaya and Avachinskaya Bays in Southeastern Kamchatka // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. V. 11. Art. 1299. <https://doi.org/10.3390/jmse11071299>